

# 市域快线钢弹簧隔振器力学性能及应用研究\*

黄相东<sup>1</sup>, 曾志平<sup>1,2</sup>, 罗信伟<sup>3</sup>, 李平<sup>3</sup>, 王卫东<sup>1,2</sup>

(1.中南大学土木工程学院 长沙,410075)

(2.中南大学高速铁路建造技术国家工程研究中心 长沙,410075)

(3.广州地铁设计研究院股份有限公司 广州,510010)

**摘要** 为研究钢弹簧浮置板在160 km/h的市域快线中应用的合理性,首先,通过室内试验确定适用于市域快线的钢弹簧隔振器,以及共享式隔振器的刚度和阻尼参数;其次,基于这些参数建立高速钢弹簧浮置板(high-speed steel spring floating slab track,简称HSFST)有限元模型,通过谐响应分析,对比HSFST与普通钢弹簧浮置板(steel spring floating slab track,简称FST)以及普通道床(ordinary track,简称OT)的隔振性能表现。结果表明:相比于OT,浮置板轨道具有更低的传递力和基础反力,且沿纵向能够更有效地传递变形和作用力;HSFST具有更高的隔振率,其固有频率和放大频段的范围均低于FST;共享式隔振器的应用可有效提高板间连接强度和力的传递效率,尽管这会增加共享隔振器所在位置的基础反力,但其他位置的基础反力得以显著降低;HSFST具有更低的变形、传递力、基础反力以及更高的隔振率,在市域快线中综合性能更优。

**关键词** 市域快线;高速钢弹簧浮置板;钢弹簧隔振器;室内试验;谐响应分析;隔振率

**中图分类号** U213.2;TH6

## 引言

近年来,城市轨道交通运营引发的振动和噪声问题日益受到关注。钢弹簧浮置板轨道结构凭借自身独特的减振特性,在地铁建设中得到了广泛应用<sup>[1]</sup>,国内外学者针对其隔振性能已开展大量研究。

何庆烈等<sup>[2-3]</sup>通过钢弹簧隔振器刚度和阻尼试验,研究了加载幅值和加载频率变化对隔振器动刚度和损耗因子的影响。李永朋<sup>[4]</sup>研究了疲劳前后钢弹簧隔振器刚度和阻尼参数变化规律。宋皎皎等<sup>[5]</sup>对比了落轴和循环加载隔振器阻尼比试验结果,研究了固有频率计算方法以及循环加载次数对阻尼比的影响。朱志辉等<sup>[6]</sup>建立了车辆-浮置板垂向振动模型,获得隔振器垂向动反力的随机性特征。程霖等<sup>[7]</sup>将钢弹簧浮置板轨道视为弹性地基梁,通过建立和求解其变形的控制微分方程,分析了钢弹簧浮置板轨道与隧道底板相互作用规律。此外,唐伟等<sup>[8]</sup>对现场曲线地段的钢轨波磨进行调查测试,结合有限元模型分析了结构的振动特性与波磨通过频率的内在联系。郭无极等<sup>[9]</sup>应用车辆-轨道-下部基础耦合动力学模型,对比了12号道岔区域分别铺设

整体道床及钢弹簧浮置板的行车安全性和舒适性。尽管针对钢弹簧浮置板的研究已取得一系列成果<sup>[10-12]</sup>,但现有结构所适配的地铁线路设计速度均低于120 km/h<sup>[13]</sup>。

为适应160 km/h市域快线的运行条件,在HSFST下,本研究采用适配的隔而固(青岛)振动控制有限公司钢弹簧隔振器(GERB steel spring vibration isolator,简称GSVI)进行支承,并在板间连接处安装共享式钢弹簧隔振器(shared steel spring vibration isolator,简称SSVI),以提高轨道的平顺性。首先,通过动静刚度试验与锤击法自由振动衰减试验,测定上述2类钢弹簧隔振器的刚度和阻尼参数;其次,基于ANSYS软件分别建立HSFST、FST以及OT的有限元模型;最后,基于谐响应分析,对比研究不同轨道结构形式对于变形、力的传递及隔振效果的影响。

## 1 钢弹簧隔振器力学性能参数

钢弹簧隔振器是钢弹簧浮置板轨道的主要支承和振动隔离部件,其刚度和能量损耗分别由隔振器

\* 广州市越秀区科技工业和信息化局科技计划资助项目(2017-GX-024)

收稿日期:2023-04-28;修回日期:2023-07-07

内部的钢弹簧和阻尼介质提供,两者是影响浮置板轨道变形和减振性能的重要参数。钢弹簧隔振器如图 1 所示。

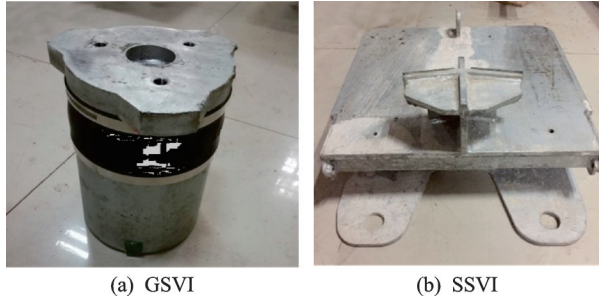


图1 钢弹簧隔振器

Fig.1 Steel spring vibration isolators

### 1.1 静刚度试验

#### 1.1.1 试验方案

采用 PMS-500A 型数显式液压疲劳试验机进行加载试验,刚度试验如图 2 所示。位移、加载力分别由位移传感器、疲劳试验机自带力传感器读取。将浮置板分配到每个隔振器的力(约 20 kN)定义为荷载下限,以 2~3 kN/s 的速度按照 10 kN 每级匀速加载,每级持荷 20 s。为减小误差,每种隔振器均进行 3 次加卸载循环,以 3 组试验的平均值作为试验结果。

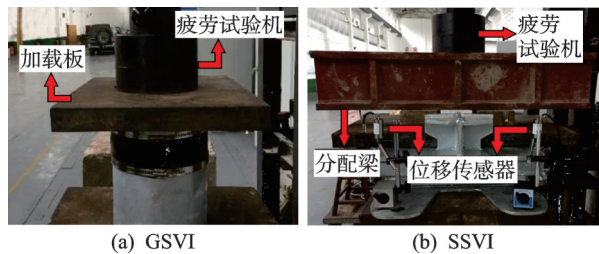


图2 刚度试验

Fig.2 Stiffness test

#### 1.1.2 试验结果

多级加载下,加载力-位移曲线如图 3 所示,展示了两类钢弹簧隔振器的加载力-位移变化规律及其拟合曲线。由图可知,GSVI 的加载力-位移关系基本呈线性变化,对应静刚度为 6.5 kN/mm;SSVI 则呈非线性变化,随着荷载的增加,切线刚度逐渐增大,变化规律可拟合为

$$F = 0.7d^2 + 7.6d + 2.9 \quad (1)$$

其中: $F$  为隔振器承受的荷载; $d$  为隔振器压缩位移。

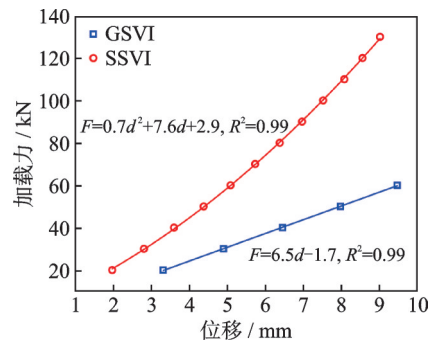


图3 加载力-位移曲线

Fig.3 Curves of load-displacement

### 1.2 动刚度试验

#### 1.2.1 工作区间确定

在实际工况下,隔振器除承受轨道自重产生的静荷载作用,还需承受列车运行产生的往复动荷载。当考虑荷载频率、阻尼和质量的影响时,隔振器静刚度与动刚度通常并不相等<sup>[14]</sup>。因此,为确定两类隔振器的动刚度,需明确隔振器在实际使用时的的工作区间。

对于时速 160 km/h、轴重 17.85 t 的市域快线,参考《高速铁路设计规范》<sup>[15]</sup>,将轴重乘以动力系数 1.5,并对结果进行取整,可得总荷载为 550 kN。将隔振器在轨道自重和列车荷载共同作用工况下承受的荷载视为隔振器工作区间的上限,将隔振器在轨道自重工况下承受的荷载视为隔振器工作区间的下限。钢弹簧隔振器工作区间如表 1 所示。使用图 3 中拟合曲线进行计算,可得 GSVI、SSVI 钢弹簧隔振器在工作区间的割线静刚度分别为 6.5、14 kN/mm。

表1 钢弹簧隔振器工作区间

Tab.1 Working range of steel spring vibration isolators

隔振器类型	轴力/kN	
	自重	自重+列车荷载
GSVI	15.790	43.992
SSVI	26.309	88.191

#### 1.2.2 试验方案

在表 1 的基础上,将 GSVI、SSVI 荷载上下限分别设为 15~45、30~90 kN。采用疲劳试验机分别对隔振器施加正弦循环荷载,加载频率为 3 Hz<sup>[2]</sup>。荷载曲线如图 4 所示。

每组试验均循环加载 1 000 次,并以最后 100 次循环中选取的 10 次循环加载数据计算动刚度。隔振器动刚度为

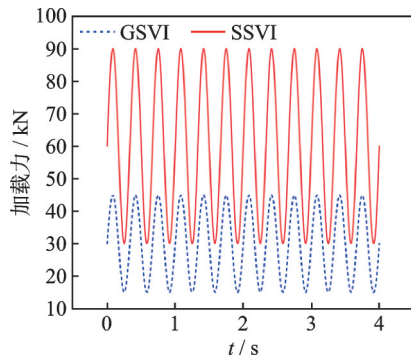


图4 正弦循环荷载

Fig.4 Sinusoidal cyclic loading

$$k = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \quad (2)$$

其中: $F_{\max}$ 和 $F_{\min}$ 分别为周期内的最大和最小载荷; $d_{\max}$ 和 $d_{\min}$ 分别为周期内隔振器的最大和最小压缩位移。

### 1.2.3 试验结果

正弦循环荷载作用下,两类钢弹簧隔振器的动静刚度对比如表2所示。由表可知,两类钢弹簧隔振器的动刚度与静刚度相比均有所变化,与何庆烈等<sup>[3]</sup>的研究结果近似。因此,在数值模拟过程中,应考虑隔振器动载刚度,以获得更准确的结果。

表2 动静刚度对比

Tab.2 Comparison of dynamic and static stiffness

类型	荷载/kN		位移/mm		动刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )	静刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )	动静刚 度比
	下限	上限	下限	上限			
GSVI	15	45	2.310	7.150	6.2	6.5	0.95
SSVI	30	90	1.818	5.895	14.7	14.0	1.05

## 1.3 锤击法自由振动衰减试验

### 1.3.1 试验原理

浮置板在卸载后,因阻尼作用而经历自由振动衰减阶段,振动幅值发生衰减。因此,可根据低阻尼自由振动方程的解,结合对数衰减法确定钢弹簧隔振器阻尼比。通过在钢弹簧隔振器上放置混凝土质量块,构建质量-弹簧-阻尼单自由度体系。体系运动方程为

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (3)$$

令 $u = Ge^{St}$ ,并引入阻尼比 $\xi = c/c_c$ ,低阻尼时<sup>[16]</sup>的解为

$$S_{1,2} = -\xi\omega_n \pm i\omega_n\sqrt{1-\xi^2} \quad (4)$$

最终解为

$$u = e^{\xi\omega_n t} \left[ u(0) \cos(\omega_D t) + \frac{\dot{u}(0) + \xi\omega_n u(0)}{\omega_D} \sin(\omega_D t) \right] \quad (5)$$

其中: $\xi$ 为体系的阻尼比; $\omega_n$ 为无阻尼体系圆频率;

$\omega_D = \omega_n\sqrt{1-\xi^2}$ ,为阻尼体系圆频率。

对相隔 $n$ 个波的振幅比两边取自然对数,得到黏滞阻尼自由振动的对数衰减率 $\delta$ <sup>[17]</sup>为

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{u_i}{u_{i+n}} = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (6)$$

$$\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4\delta^2}{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (7)$$

其中: $\delta$ 为对数衰减率; $u_i$ 为第 $i$ 个波峰幅值; $u_{i+n}$ 为第 $i+n$ 个波峰幅值; $n$ 为波峰幅值相隔的波数。

### 1.3.2 试验方案

自由振动衰减试验如图5所示。在钢弹簧隔振器上放置1个质量约为1 t的混凝土质量块进行试验时,将混凝土块中心设置为锤击点。为提升试验精度,在锤击点四周对称放置4个加速度传感器,并对所采集振动信号取平均值,消除质量块在2个水平方向的侧摆信号,得到垂向振动衰减信号。由于是基于位移参数计算对数衰减率,故需采用频域积分法<sup>[18]</sup>对采集的加速度信号进行二次积分,以获得位移信号。

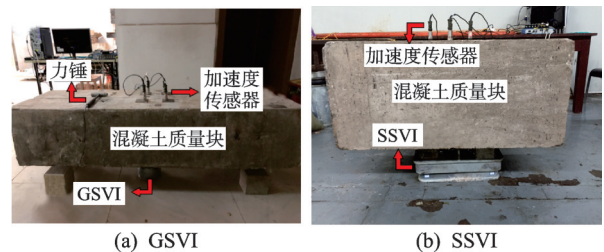


图5 自由振动衰减试验

Fig.5 Free vibration damping test

计算对数衰减率前,根据1.1节中两类钢弹簧隔振器的静刚度与式(8)估算单自由度体系的固有频率,即

$$\xi = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (8)$$

其中: $f$ 为一阶固有频率; $k$ 为隔振器垂向刚度; $m$ 为上置混凝土质量。

由式(8)估算可得,GSVI与SSVI的固有频率分别约为12.8、18.8 Hz。为提高分析准确性并消除环境干扰信号的影响,将固有频率上下限分别放大20%<sup>[17]</sup>,作为带通滤波的上下限,并利用带通滤波

器弱化固有频率以外频段的干扰。针对力锤激励产生的位移信号,选取间隔 4 个周期的前后 2 个波峰<sup>[17]</sup>,根据式(7)分别计算 GSVI 与 SSVI 的阻尼比。

1.3.3 试验结果

带通滤波后,GSVI 与 SSVI 的钢弹簧隔振器自由振动衰减曲线如图 6 所示。由式(7)计算可得,GSVI、SSVI 的阻尼比分别为 0.065 7、0.072 0。

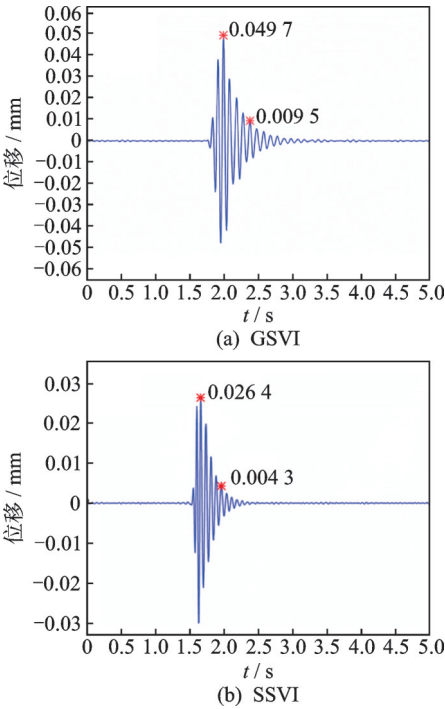


图 6 钢弹簧隔振器自由振动衰减曲线(滤波后)

Fig.6 Free vibration damping curves of steel spring vibration isolator (filtered)

2 模型参数

采用有限元软件 ANSYS 建立 HSFST、FST 以及 OT 的有限元模型<sup>[19]</sup>,轨道结构包括钢轨、扣件、轨道板、钢弹簧隔振器以及基础。为减小边界条件的影响,模型中建立了 3 块轨道板,并以中间板为主要研究对象。同时,在轨道板两端分别增加 6 m 的钢轨延长段。钢轨选用 Beam188 梁单元进行模拟,并赋予 60 kg/m 钢轨截面。轨道板选用 Solid65 实体单元进行模拟,HSFST 板的长宽厚为 4.8 m×2.9 m×0.55 m;FST 板的长宽厚为 4.8 m×2.7 m×0.34 m;OT 尺寸与 FST 一致;基础的长宽厚尺寸为 19.4 m×6.5 m×1 m。

GSVI 与 SSVI 浮置板板间通过剪力铰连接,采用 Beam188 梁单元模拟,扣件和隔振器均采用 Combin14 弹簧-阻尼单元模拟。钢弹簧隔振器布置

如图 7 所示。弹簧参数如表 3 所示。轨道结构材料参数如表 4 所示。当模型质量较大时,质量阻尼  $\alpha$  会导致动力分析误差过大。由于模型已考虑材料阻尼,因此仅引入刚度阻尼系数  $\beta$  以抑制轨道结构的高频振动<sup>[20]</sup>,其值为  $1.1\times 10^{-3}$ 。

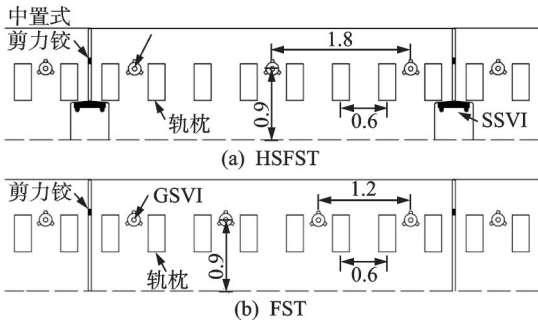


图 7 钢弹簧隔振器布置(单位: mm)

Fig.7 Layout of steel spring vibration isolators (unit: mm)

表 3 弹簧参数

Tab.3 Parameters of springs

弹簧参数	扣件 <sup>[21]</sup>	GSVI	SSVI	普通钢弹簧隔振器 <sup>[21]</sup>
刚度/(kN·mm <sup>-1</sup> )	50.0	6.2	14.7	6.3
阻尼/(kN·s·m <sup>-1</sup> )	75.0	13.5	27.9	12.0

表 4 轨道结构材料参数

Tab.4 Parameters of track structure materials

结构	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	材料阻尼比
钢轨	7 850	206.0	0.30	0.004
轨道板	2 500	36.5	0.20	0.020
基础	2 300	5.0	0.25	0.010
剪力铰	7 850	206.0	0.30	—

轨道结构为对称结构,且承受对称荷载,建立半模型并施加对称约束可大幅降低单元和节点数量,同时提高计算效率。轨道结构在实际工况中受重力作用,谐响应分析须考虑重力引起的预应力。简谐激励荷载以转向架分布形式加载,半模型共计 2 个加载点,纵向间距为 2.5 m,在相应轮载处各施加幅值为 137.5 kN(1/2 轴重)、频率为 0~200 Hz 的简谐力。谐响应分析有限元模型如图 8 所示。有限元模型对称截面如图 9 所示。有限元模型中,基础底面、钢轨两端以及延长段钢轨扣件处自由度均采用全约束,半模型对称截面自由度采用对称约束。

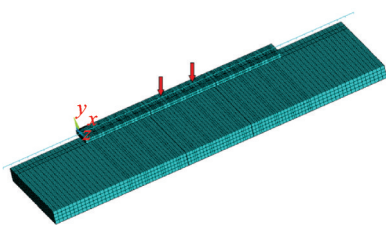


图8 谐响应分析有限元模型

Fig.8 Finite element model for harmonic response analysis

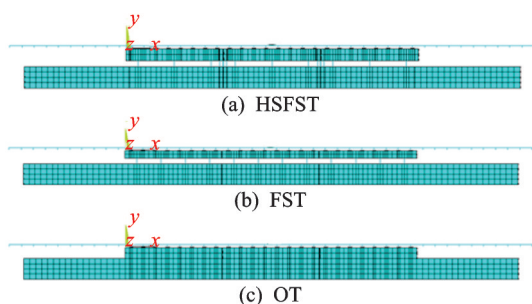


图9 有限元模型对称截面

Fig.9 Symmetric cross-section of finite element model

### 3 谐响应分析结果

持续的周期性荷载在结构系统中产生的持续周期响应称为谐响应。通过对结构施加不同频率的简谐激励荷载,可得到响应随频率变化的关系,有助于确定与结构自身相关的稳态响应。

#### 3.1 钢轨位移分析

为对比钢弹簧隔振器的型号与布置方案对轨道结构在市域快线列车荷载作用下所产生变形的影响,分别提取HSFST、FST与OT在轨道板上方钢轨的垂向位移数据。频率-距离-钢轨位移联合分布如图10所示。对比图10中3种轨道结构的钢轨位移随激励频率分布可知,OT的钢轨位移幅值最小。由于未插入较小刚度的弹簧隔振器,OT位移在0~200 Hz频段内的衰减十分有限,且主要分布在第2块轨道板范围内(5~10 m),沿纵向的传递效率较差。相比于OT,由于钢弹簧隔振器的变形更大,HSFST、FST钢弹簧浮置板的钢轨位移较大。其中,FST最大,HSFST次之,这主要是由于为满足市域快线的运行要求,HSFST的整体支承刚度的设计值需高于FST。

得益于剪力铰的连接作用,HSFST、FST钢弹簧浮置板均能够沿纵向有效传递钢轨位移,荷载向周围连接板的有效分配可减轻应力集中,延长轨道结构的使用寿命。与FST相比,HSFST在钢轨位移幅值以及位移分配方面均具有优势,表明采用

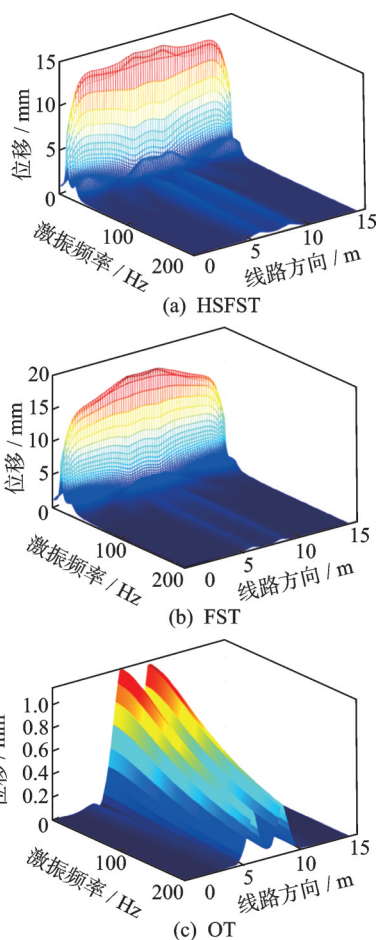


图10 频率-距离-钢轨位移联合分布

Fig.10 Joint distribution of frequency-distance-rail displacement

SSVI不仅可提高轨道结构支承刚度,同时加强了板间连接,在市域快线发挥出更出色的荷载分配效果。

#### 3.2 传递力分析

不同激励频率下的轨道结构表现出不同的响应规律,因而可用响应力在结构内的传递性来评价轨道结构的隔振性能,为此引入传递力 $F_{tr}^{[22]}$ 和隔振率 $T^{[23]}$ 的概念,计算式分别为

$$F_{tr} = \sqrt{\sum_{q=1}^{Q_b} |F_{bq}|^2} \quad (9)$$

$$T = 1 - \frac{F_{tr}}{F} \quad (10)$$

其中: $F_{bq}$ 为浮置板下第 $q$ 个隔振器受力,整体道床第 $q$ 个轨下扣件受力; $Q_b$ 为隔振器或是扣件总数; $F$ 为总激励力幅值。

基于式(9)、式(10)计算得到如图11所示的轨道系统传递力和隔振率。当 $T > 0$ 时,表明系统在该频段具有隔振效果;反之,则表明振动在该频段被放大。

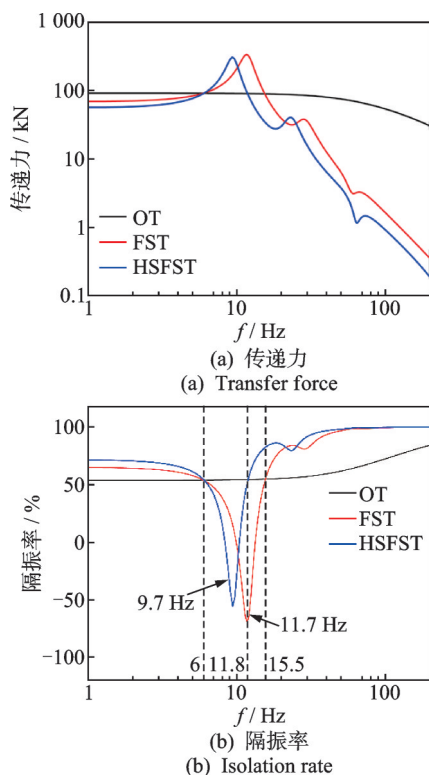


图11 轨道系统传递力和隔振率

Fig.11 Transfer force and isolation rate of track system

由图11可知,HSFST、FST的固有频率分别为9.7、11.7 Hz,相应的隔振率分别为-56%、-70%。两类浮置板轨道在各自固有频率附近均出现振动放大现象,这是轨道板底部插入柔性隔振器所引起的典型现象<sup>[23]</sup>。其中,HSFST、FST放大频段分别为6~11.8、6~15.5 Hz;在放大频段之外,相较于OT,两类浮置板均表现出优异的隔振性能。此外,相比于FST,HSFST的轨道板设计尺寸明显增加,因而引入了更大的参振质量。因此,HSFST固有频率和放大频段的范围均低于FST,在市域快线中可发挥更好的隔振效果。

### 3.3 隔振效果分析

基础反力是评估轨道结构隔振效果的关键指标,亦能反映板下支撑方式对传递力分配的影响<sup>[24]</sup>。为对比研究3类轨道结构的基础反力在频域和线路纵向的分布规律,提取对称截面基础上表面节点反力,并进行相应数据分析。频率-距离-基础反力联合分布如图12所示。

由图可知,基础反力峰值均出现在各结构的固有频率处。OT的基础反力集中在受力的第2块轨道板(5~10 m),基础反力随频率的变化不明显,但最大基础反力为1.4 kN。相比之下,浮置板轨道采

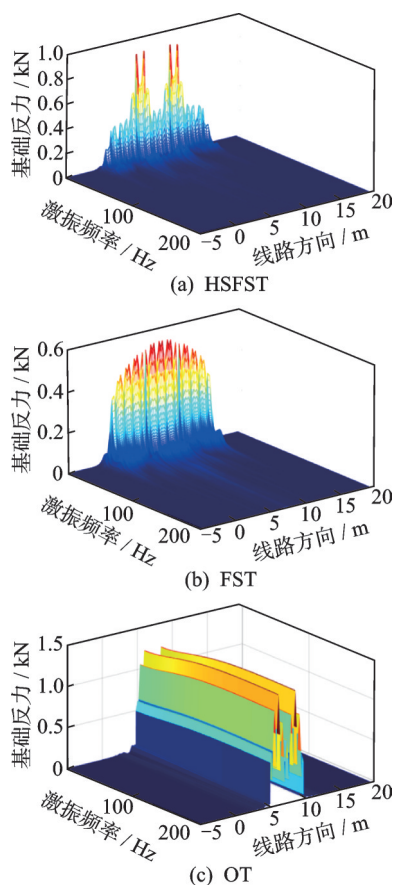


图12 频率-距离-基础反力联合分布

Fig.12 Joint distribution of frequency-distance-foundation reaction

用剪力铰增加板间连接强度,可将作用力沿线路纵向分散,影响范围可扩展至-0.5~15.5 m。此外,隔振器的使用显著降低了基础反力幅值,HSFST、FST对应的最大基础反力分别为0.9、0.6 kN,两者仅在固有频率附近的基础反力接近OT,隔振效果不佳;而在其余频段的隔振效果较好,基础反力随频率的提高而迅速衰减。

HSFST在SSVI处的基础反力达到最大值,且高于FST的基础反力幅值。然而,在沿线路纵向的其他范围内,HSFST的基础反力小于SSVI。这说明SSVI的支承效果较好,有助于提高板间连接强度,并促进力沿线路纵向的传递。由于SSVI位置的基础受力较为集中,在实际使用中应重点关注该位置的健康状态。综合而言,HSFST在市域快线中展现出更优的综合性能。

## 4 结论

1) 通过动静刚度试验与锤击法自由振动衰减试验,得到GSVI和SSVI的刚度与阻尼参数;基于

所得参数建立了HSFST三维有限元模型,通过谐响应分析与OT、FST的表现进行了对比研究。

2) GSVI的动、静刚度分别为6.2、6.5 kN/mm,动静刚度比为0.95,阻尼比为0.066;SSVI的动、静刚度分别为14.7、14 kN/mm,动静刚度比为1.05,阻尼比为0.072。

3) 相比于OT,钢弹簧浮置板能够沿纵向有效传递钢轨变形,且位移随着频率的增加而明显衰减,其在荷载传递和衰减方面的效果显著;与FST相比,HSFST具有质量和板间连接优势,在上述方面的表现更优。

4) 钢弹簧浮置板轨道的传递力与基础反力均随频率的提高而显著衰减,仅在其固有频率附近出现振动放大;在放大频段外,相较于OT,HSFST、FST均能发挥优秀的隔振效果;由于HSFST参振质量更大,其固有频率和放大频段范围均低于FST,且在振动放大频段外具有更高的隔振率。

5) 相较于OT,钢弹簧浮置板轨道可将作用力沿线路纵向分散,增大列车振动的纵向影响范围,同时降低了基础反力的幅值;HSFST的基础反力仅在SSVI处高于FST,在沿线路纵向的其他范围内,HSFST的基础反力小于SSVI;使用SSVI可有效提高板间连接强度和力的传递效率。

6) HSFST在变形控制、力的传递以及隔振效果方面均优于FST,更适用于市域快线。本研究可为预制钢弹簧浮置板在市域快线的应用提供参考。

## 参 考 文 献

- [1] HUANG K, HONGBAIB B, DONGWEIDW L I, et al. Coupling dynamic analysis of floating slab track in the urban rail transit[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 253/255: 2047-2051.
- [2] 何庆烈,朱胜阳,蔡成标,等. 地铁浮置板用钢弹簧隔振器力学特性试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(8): 1492-1498.  
HE Qinglie, ZHU Shengyang, CAI Chengbiao, et al. Experimental study on mechanical characteristics of the subway-using steel spring vibration isolator[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(8): 1492-1498. (in Chinese)
- [3] 何庆烈,王建伟,陈再刚,等. 地铁浮置板用隔振器刚度与阻尼试验[J]. 西南科技大学学报, 2015(4): 38-41.  
HE Qinglie, WANG Jianwei, CHEN Zaigang, et al. Stiffness and damping measurement of vibration isolator used for the metro floating slab[J]. Journal of South-west University of Science and Technology, 2015(4): 38-41. (in Chinese)
- [4] 李永朋. 地铁浮置板金属隔振器的性能的试验研究[J]. 安徽建筑, 2019, 26(6): 190-191, 201.  
LI Yongpeng. Experimental study on performance of metal isolators for subway floating slab[J]. Anhui Architecture, 2019, 26(6): 190-191, 201. (in Chinese)
- [5] 宋姣姣,高志升,练松良. 钢弹簧浮置板阻尼比试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(4): 44-49.  
SONG Jiaojiao, GAO Zhisheng, LIAN Songliang. Test and research of damping ratio for steel spring floating slab[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2017, 34(4): 44-49. (in Chinese)
- [6] 朱志辉,黄宇佳,黄承志,等. 钢弹簧浮置板隔振器垂向动反力随机振动特征研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(16): 204-212, 219.  
ZHU Zhihui, HUANG Yujia, HUANG Chengzhi, et al. Random characteristics for vertical dynamic reaction force of steel spring isolator in a floating slab[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(16): 204-212, 219. (in Chinese)
- [7] 程霖,杨成永,马文辉,等. 隧道变形引起的钢弹簧浮置板轨道变形与脱空分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(4): 849-857.  
CHENG Lin, YANG Chengyong, MA Wenhui, et al. Analysis on deformation and detachment of the steel spring floating slab track induced by tunnel deformation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(4): 849-857. (in Chinese)
- [8] 唐伟,李霞,李伟,等. 钢弹簧浮置板轨道振动特性与钢轨波磨关系研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(12): 3636-3644.  
TANG Wei, LI Xia, LI Wei, et al. Study on the relationship between steel spring floating slab track vibration characteristics and rail corrugation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(12): 3636-3644. (in Chinese)
- [9] 郭无极,曾志平,王卫东,等. 12号道岔区敷设钢弹簧浮置板的安全性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(11): 3208-3216.  
GUO Wuji, ZENG Zhiping, WANG Weidong, et al. Safety study of steel spring floating plates applied to No. 12 turnout[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(11): 3208-3216. (in Chinese)
- [10] WANG J W, CAI C B, ZHU S Y. Experimental study on frequency and amplitude dependent behavior of dynamic parameters of steel-spring vibration isolator used in floating slab track[J]. Scientia Sinica Technologica, 2016, 46(8): 808-814.

- [11] ZHANG H, HUO M M, MENG L, et al. Site test and analysis of vibration attenuation effect of steel spring floating slab track[J]. *Advanced Materials Research*, 2015, 1065/1069: 388-392.
- [12] LEI X Y, JIANG C D. Analysis of vibration reduction effect of steel spring floating slab track with finite elements[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2016, 22(6): 1462-1471.
- [13] AUERSCH L. Dynamic behavior of slab tracks on homogeneous and layered soils and the reduction of ground vibration by floating slab tracks[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2012, 138(8): 923-933.
- [14] 李世尧, 张卫国, 侯军占, 等. 减振器动刚度特性研究[J]. *兵工学报*, 2017, 38(11): 2274-2279.  
LI Shiyao, ZHANG Weiguo, HOU Junzhan, et al. Research on dynamic stiffness of vibration isolator[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(11): 2274-2279. (in Chinese)
- [15] 国家铁路局. TB 10621—2014 高速铁路设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
- [16] 周智辉, 文颖, 曾庆元. 结构动力学讲义[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017: 80-85.
- [17] 王金, 李玉路, 邵文杰, 等. 基于自由振动的钢弹簧浮置板阻尼比测试分析[J]. *华东交通大学学报*, 2015, 32(5): 1-5.  
WANG Jin, LI Yulu, SHAO Wenjie, et al. Damping ratio testing of steel spring floating slab based on free vibration[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2015, 32(5): 1-5. (in Chinese)
- [18] 王济, 胡晓. MATLAB在振动信号处理中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社知识产权出版社, 2006: 105-108.
- [19] 王新敏. ANSYS结构动力分析与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014: 102-110.
- [20] 宋姣姣, 练松良, 高云锋. 弹簧浮置板用隔振器阻尼比的设计取值研究[C]//第十三届全国振动理论及应用学术会议. 西安: 中国振动工程学会, 2019: 397-404.
- [21] 朱志辉, 黄宇佳, 黄承志, 等. 考虑剪力铰作用的预制短型钢弹簧浮置板轨道动力响应研究[J]. *振动工程学报*, 2021, 34(4): 799-808.  
ZHU Zhihui, HUANG Yujia, HUANG Chengzhi, et al. Dynamic response of prefabricated short steel spring floating slab tracks considering shearing hinge[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2021, 34(4): 799-808. (in Chinese)
- [22] 梁上燕, 肖安鑫, 耿传智. 阻尼钢弹簧浮置板轨道结构隔振性能分析[J]. *噪声与振动控制*, 2013(1): 136-139.  
LIANG Shangyan, XIAO Anxin, GENG Chuanzhi. Analysis of vibration isolation performance of floating slab track structure with damping steel springs[J]. *Noise and Vibration Control*, 2013(1): 136-139. (in Chinese)
- [23] 高亮, 钟阳龙, 梁淑娟, 等. 浮置式轨道在垂向弯曲振动模态下的振动放大效应研究[J]. *铁道学报*, 2017, 39(8): 114-121.  
GAO Liang, ZHONG Yanglong, LIANG Shujuan, et al. Analysis of vibration magnification effect of floating slab track under vertical bending vibration mode[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2017, 39(8): 114-121. (in Chinese)
- [24] 蒋崇达, 雷晓燕. 钢弹簧浮置板轨道结构谐波响应分析[J]. *城市轨道交通研究*, 2013, 16(11): 25-31.  
JIANG Chongda, LEI Xiaoyan. Analysis of harmonic response of steel spring floating slab track structure[J]. *Urban Mass Transit*, 2013, 16(11): 25-31. (in Chinese)



**第一作者简介:**黄相东,男,1996年12月生,博士生。主要研究方向为轨道结构振动控制研究。曾发表《Experimental study on vibration characteristics of the floating slab with under-slab polyurethane mats considering fatigue loading effect》(《Engineering Structures》2023, Vol. 276)等论文。

E-mail: huang.x.d@csu.edu.cn

**通信作者简介:**曾志平,男,1975年6月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为铁路轨道结构课程教学与科学研究。

E-mail: 203160@csu.edu.cn